

## KARAKTERISASI INGOT PADUAN Zr-Mo-Fe-Cr PASCA PERLAKUAN PANAS

Sungkono dan Isfandi

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspipetek, Serpong, Tangerang

### ABSTRAK

**KARAKTERISASI INGOT PADUAN Zr-Mo-Fe-Cr PASCA PERLAKUAN PANAS.** Ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr hasil leburan (*as melt*) mempunyai mikrostruktur tidak homogen, yaitu campuran butir dendrit dan *acicular*. Ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr perlu diperlakukan panas agar diperoleh mikrostruktur ekuiaksial dan homogen. Sasaran yang ingin dicapai dengan mikrostruktur tersebut adalah ingot paduan bersifat lunak sehingga memudahkan proses pengerjaan berikutnya dengan deformasi besar tanpa retak. Tujuan penelitian adalah mendapatkan karakteristik ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas, yang meliputi mikrostruktur, kekerasan, dan komposisi kimia. Metoda yang digunakan adalah perlakuan panas terhadap ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr; dan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5% Cr pada temperatur 650 °C dengan waktu penahanan 1 jam, pengamatan mikrostruktur menggunakan mikroskop optik, uji kekerasan menggunakan *microhardness Vickers*, dan uji komposisi kimia menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF). Hasil penelitian menunjukkan bahwa mikrostruktur Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5% Cr relatif homogen dengan struktur butir ekuiaksial berukuran kecil. Sementara itu, mikrostruktur Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr belum homogen dengan struktur butir batang pipih dan ekuiaksial. Kekerasan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5% Cr adalah 490,80 VHN, sedangkan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5% Cr adalah 536,80 VHN. Komposisi kimia paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr adalah Zr = 98,8537 %, Mo = 0,2860 %, Fe = 0,4371%, Cr = 0,4232 % berat, sedangkan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr adalah Zr = 98,8033 %, Mo = 0,3467 %, Fe = 0,4804 %, Cr = 0,3696 % berat. Karakter paduan yaitu mikrostruktur, kekerasan, dan komposisi kimia dipengaruhi oleh perlakuan panas dan kandungan unsur Mo dari ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr.

**Kata kunci :** Karakterisasi, perlakuan panas, mikrostruktur, kekerasan, komposisi kimia.

### ABSTRACT

**CHARACTERIZATION OF Zr-Mo-Fe-Cr ALLOY INGOT AFTER HEAT TREATMENT.** *As-melt Zr-Mo-Fe-Cr alloy ingot possesses microstructure that is inhomogeneous, which is a mixture of dendrite grains and acicular. The Zr-Mo-Fe-Cr alloy ingot requires heat treatment in order to obtain an equiaxial and homogeneous microstructure. The aim to attain such microstructure is to produce soft alloy ingot so as to allow easy treatment in the next stage, with large deformation without cracking. The objective of this study is to acquire the characteristics of Zr-Mo-Fe-Cr alloy ingot after heat treatment, which include microstructure, hardness and chemical composition. The methods being employed are heat treatment for Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr and Zr-0.4%Mo-0.5%Fe-0.5%Mo alloy ingots at a temperature of 650 °C with soaking time of 1 hour, observation of microstructure using optical microscope, hardness testing using Vickers microhardness, and chemical composition testing using X-ray Fluorescence (XRF). The results of the study shows that*

*the microstructure of Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr is relatively homogeneous with small equiaxial grain structure. Meanwhile, the microstructure of Zr-0.4%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr is not homogeneous with columnar and equiaxial grain structure, The hardness of Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloy is 490.80 VHN, whereas the hardness for Zr-0.4%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloy is 536.80 VHN. The chemical composition of Zr-0.3%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr is Zr = 98.9137 wt%, Mo = 0.2460 wt%, Fe = 0.4371 wt%, Cr = 0.4032 wt%; whereas the chemical composition for Zr-0.4%Mo-0.5%Fe-0.5%Cr alloy is Zr = 98.8733 wt%, Mo = 0.3067 wt%, Fe = 0.4804 wt%, Cr = 0.3696 wt%. The alloy characteristics which include microstructure, hardness, and chemical composition are influenced by heat treatment and the Mo content in the Zr-Mo-Fe-Cr alloy ingot.*

*Free terms : Characterization, heat treatment, microstructure, hardness, chemical compositions.*

**Keyword :** *Characterization, heat treatment, microstructure, hardness, chemical composition.*

## PENDAHULUAN

Logam paduan Zr-Mo-Fe-Cr harus memenuhi persyaratan sifat fisis, mekanik, kimia, dan neutronik sebagai salah satu kandidat bahan struktur elemen bakar nuklir di masa mendatang. Logam paduan tersebut dibuat dari campuran sponge Zr, serbuk Mo, Fe, dan Cr dengan persentase berat tertentu, kemudian dilebur dalam tungku peleburan vakum, dan dihasilkan ingot. Persentase berat unsur pepadu (Mo, Fe, dan Cr) mempengaruhi sifat fisis, mekanik, kimia, dan neutronik dari paduan berbasis zirkonium<sup>[1,2]</sup>.

Ingot *as melt* belum mempunyai mikrostruktur yang homogen, sehingga perlu diperlakukan terlebih dahulu agar diperoleh mikrostruktur yang homogen. Pada prinsipnya proses perlakuan panas terhadap ingot paduan adalah proses pemanasan ingot pada temperatur setinggi mungkin dengan syarat tidak terjadi pencairan atau tidak terjadi pertumbuhan butir yang berlebihan. Oleh karena itu proses perlakuan panas ingot paduan biasanya dilakukan pada temperatur di sekitar temperatur rekristalisasi, ditahan beberapa lama pada temperatur tersebut, kemudian didinginkan lambat. Proses perlakuan panas tersebut bertujuan untuk mendapatkan mikrostruktur ekuiaxial dan homogen, sehingga paduan lebih lunak dan memudahkan proses pengerjaan logam

paduan berikutnya. Oleh karena logam paduan menjadi lunak maka memungkinkan terjadinya proses deformasi cukup besar tanpa retak, dan gaya pembentukan lebih rendah dibandingkan pengerjaan logam paduan dengan mikrostruktur tidak homogen<sup>[3,4]</sup>.

Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya<sup>[5]</sup>, diketahui bahwa ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr yang telah diperlakukan pada 650 °C dengan waktu penahanan 30 menit, mempunyai kecenderungan sama yaitu mikrostrukturnya berupa butir *acicular* dengan ukuran tidak seragam. Untuk mendapatkan struktur butir ekuiaxial yang homogen, dibutuhkan proses perlakuan panas yang tepat. Untuk itu, parameter proses perlakuan panas terhadap paduan Zr-Mo-Fe-Cr perlu diubah, agar diperoleh paduan yang mempunyai mikrostruktur ekuiaxial dan homogen<sup>[5]</sup>. Dalam penelitian ini, paduan Zr-Mo-Fe-Cr diperlakukan pada temperatur 650°C dengan waktu penahanan 1 jam.

Penelitian bertujuan mendapatkan karakter mikrostruktur, kekerasan, dan komposisi kimia ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas. Hipotesis penelitian adalah kandungan Mo dan perlakuan panas diduga mempengaruhi mikrostruktur, kekerasan, dan komposisi kimia paduan Zr-Mo-Fe-Cr.

## TATA KERJA

### ■ Bahan

Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian adalah ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr, kertas ampelas; resin acrylic dan pengeras; pasta intan, dan bahan etsa.

### ■ Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah tungku perlakuan panas, gergaji accutom, mesin gerinda dan polis, *microhardness Vickers*, mikroskop optik, dan XRF.(*X-ray Fluorescence*).

### ■ Metoda

Metoda yang digunakan dalam penelitian adalah perlakuan panas terhadap ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr menggunakan tungku perlakuan panas. Metoda pengamatan mikrostruktur menggunakan ASTM E 883-99 (2004) dan ASTM E 407-99 (2007), uji kekerasan menggunakan ASTM 384-08, dan uji komposisi kimia paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas menggunakan XRF .

### ■ Cara Kerja

Prosedur yang digunakan dalam penelitian tentang karakterisasi ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas dengan tahapan sebagai berikut <sup>[6]</sup>:

1. Ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dipotong untuk mendapatkan spesimen *as melt* dan spesimen untuk perlakuan panas.
2. Perlakuan panas terhadap ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr menggunakan tungku

perlakuan panas dengan temperatur 650 °C, waktu penahanan 1 jam, dan pendinginan lambat.

3. Spesimen ingot paduan *as melt* (langkah 1) dan pasca perlakuan panas (langkah 2) dibingkai, digerinda dengan kertas ampelas grit 180 sampai 1200 hingga rata dan mengkilap, dipoles menggunakan pasta intan, kemudian dietsa.
4. Mikrostruktur spesimen ingot paduan Zr- Mo-Fe-Cr hasil langkah (3) diamati dan dianalisis dengan menggunakan mikroskop optik.
5. Uji kekerasan terhadap spesimen ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr hasil langkah (3) dengan menggunakan *microhardness Vickers*.
6. Uji komposisi kimia spesimen paduan Zr-Mo-Fe-Cr hasil langkah (3) dengan menggunakan XRF.
7. Data hasil pengujian langkah (4), (5) dan (6) dianalisis untuk mendapatkan karakter ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas.

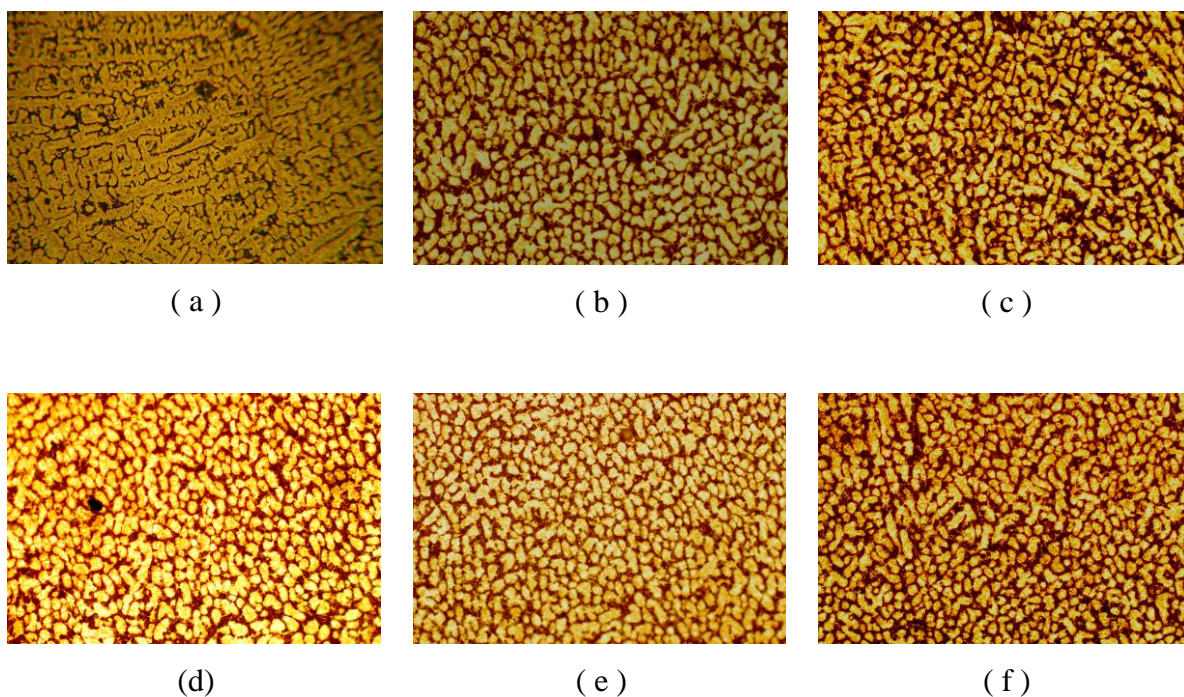
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### ■ Mikrostruktur

Mikrograf paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas pada temperatur 650° C dengan waktu penahanan 60 menit ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2. Gambar 1 memperlihatkan bahwa mikrograf Zr-0,3% Mo-0,5% Fe-0,5% Cr *as melt* mempunyai struktur butir dendrite dan *acicular* (Gambar 1 a). Sementara itu, mikrostruktur Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650° C, 1 jam) dengan 5 (lima) lokasi pengambilan mikrograf memperlihatkan kecenderungan yang sama, yaitu struktur butirnya ekuiaksial berukuran kecil. Kondisi tersebut menunjukkan terjadinya perubahan bentuk dan ukuran

butiran dari struktur butir dendrit dan *acicular* ke struktur butir ekuiaksial yang homogen. Dengan demikian proses perlakuan panas terhadap paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr mendekati sempurna. Paduan Zr-0,3% Mo-0,5% Fe-0,5% Cr yang mempunyai struktur butir ekuiaksial kecil akan mempunyai kekerasan tinggi, sehingga dibutuhkan gaya pembentukan tinggi pada proses pengerolan paduan tersebut. Disamping itu, deformasi yang dapat diterapkan terhadap paduan tanpa retak relatif kecil. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan paduan Zr-0,3% Mo-0,5% Fe-0,5% Cr yang mempunyai struktur butir ekuiaksial relatif besar dan homogen agar bersifat lunak sehingga gaya pembentukan rendah dan deformasi yang dapat diterapkan terhadap paduan relatif besar<sup>[3,5,7]</sup>. Untuk

mendapatkan mikrostruktur berupa butir ekuiaksial relatif besar maka ingot paduan Zr-0,3% Mo-0,5% Fe-0,5% Cr dipanaskan pada temperatur lebih tinggi dari 650 °C dengan waktu penahanan tetap (= 1 jam), atau temperatur tetap (= 650 °C) dengan waktu penahanan lebih lama dari 1 jam.



Gambar 1. Mikrograf Zr - 0,3% Mo - 0,5% Fe - 0,5% Cr as *melt* dan pasca perlakuan panas (650°C, 1 jam). Perbesaran : 200X.

(a) As *melt*

(b), (c), (d), (e), dan (f). Pasca perlakuan panas (650° C, 1 jam) dengan 5 lokasi pengambilan mikrograf.

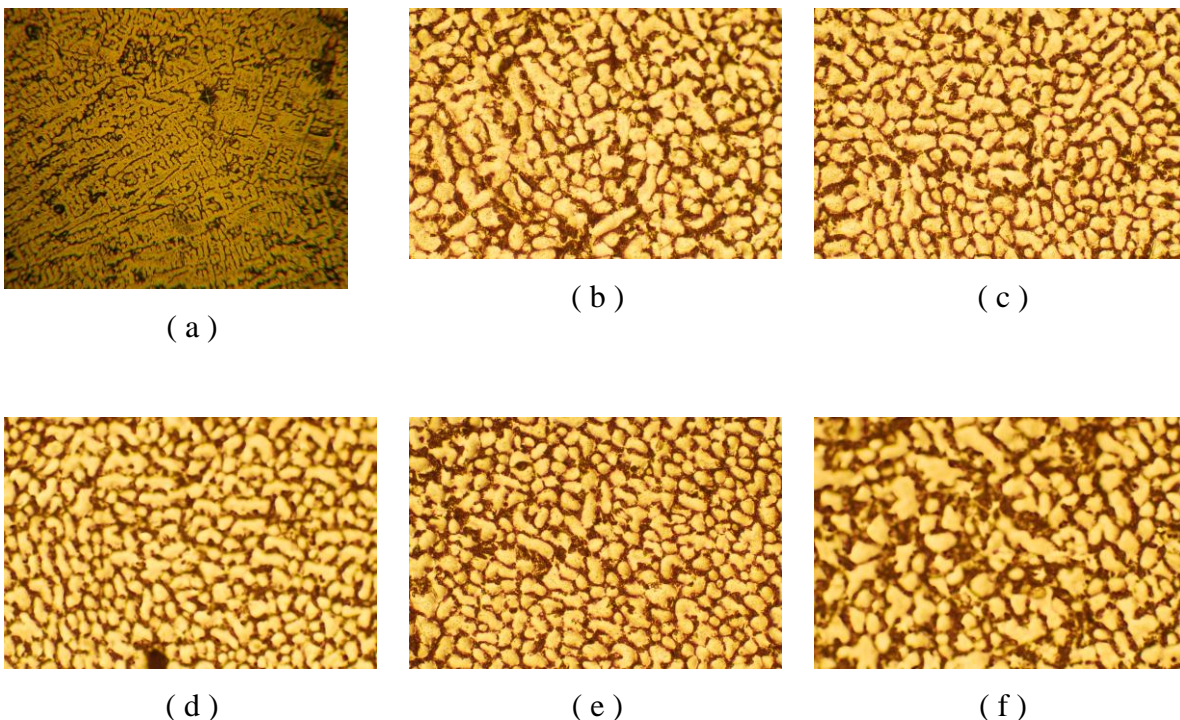
Gambar 2 memperlihatkan bahwa mikrograf Zr-0,4% Mo-0,5% Fe-0,5% Cr as

*melt* mempunyai struktur butir dendrit dan *acicular* (Gambar 2 a). Sementara itu,



mikrostruktur Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas ( $650^{\circ}\text{C}$ , 1 jam) dengan 5 (lima) lokasi pengambilan mikrograf memperlihatkan kecenderungan yang sama, yaitu struktur butirnya berupa batang pipih dan ekuiaksial. Kondisi tersebut menunjukkan telah terjadi perubahan bentuk dan ukuran butiran dari dendrit dan *acicular* ke bentuk batang pipih dan ekuiaksial. Oleh karena mikrostruktur Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr masih mempunyai 2 (dua) bentuk butir berbeda, maka proses perlakuan panas terhadap paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr belum sempurna. Sasaran yang ingin dicapai pada proses perlakuan panas terhadap ingot paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr adalah mendapatkan mikrostruktur berupa butir ekuiaksial relatif besar<sup>[5,7]</sup>. Hal ini dimaksudkan agar paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr bersifat lunak, sehingga gaya pembentukannya rendah dan deformasi yang

dapat diterapkan terhadap paduan tanpa retak relatif besar. Karakteristik paduan tersebut dibutuhkan untuk memudahkan proses pengerjaan berikutnya, seperti pengerolan. Untuk mengatasi permasalahan tersebut maka ingot paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr *as melt* dipanaskan pada temperatur lebih tinggi dari  $650^{\circ}\text{C}$  dengan waktu penahanan tetap (= 1 jam), atau temperatur tetap (=  $650^{\circ}\text{C}$ ) dengan waktu penahanan lebih lama dari 1 jam.



Gambar 2. Mikrograf Zr-0,4% Mo-0,5% Fe-0,5% Cr pasca perlakuan panas ( $650^{\circ}\text{C}$ , 1 jam). Perbesaran : 200X.  
(a) *As melt*  
(b), (c), (d), (e), dan (f). Pasca perlakuan panas ( $650^{\circ}\text{C}$ , 1 jam) dengan 5 lokasi pengambilan mikrograf.

Berdasarkan Gambar 1 dan 2 diketahui bahwa persentase berat Mo dalam paduan mempengaruhi mikrostruktur paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Mikrostruktur ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr *as melt* mempunyai struktur butir dendrit dan *acicular* dengan ukuran butir lebih besar (Gambar 1a) dibandingkan dendrit dan *acicular* dari ingot paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr (Gambar 2a). Hal ini disebabkan adanya Mo dalam paduan berbasis zirkonium bertindak sebagai unsur pengintir dalam proses solidifikasi ingot. Adanya Mo akan menimbulkan pusat-pusat pengintiran baru pada proses solidifikasi ingot sehingga dapat memperhalus ukuran butir paduan Zr-Mo-Fe-Cr<sup>[5]</sup>. Ukuran butir semakin halus apabila komposisi Mo dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr semakin besar atau semakin kasar bila komposisi Mo dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr semakin rendah.

Sementara itu, mikrostruktur ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas mempunyai struktur butir ekuiaksial relatif kecil dan homogen (Gambar 1 b, c, d, e, f) sedangkan ingot paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas mempunyai struktur butir batang pipih dan ekuiaksial relatif besar (Gambar 2 b, c, d, e, f). Oleh karena ukuran butir dendrit dan *acicular* dalam ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr lebih besar dibandingkan dengan ingot paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr, maka energi yang dibutuhkan untuk memecah pusat-pusat pengintiran hingga menjadi butir baru adalah lebih rendah. Kondisi tersebut menyebabkan terjadinya perubahan geometri dari butir dendrit dan *acicular* mengarah ke bentuk ekuiaksial dalam

ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr relatif lebih mudah dibandingkan dengan ingot paduan Zr-0,43%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr. Dengan demikian, diketahui bahwa kandungan Mo yang lebih rendah dalam paduan akan mempermudah proses perlakuan panas terhadap paduan Zr-Mo-Fe-Cr.

## ■ Kekerasan

Tabel 1. Pengaruh perlakuan panas terhadap kekerasan paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Beban uji kekerasan,  $F = 49,02 \text{ N}$ .

No	Nama Sampel	Kekerasan (VHN)	
		As <i>melt</i>	Pasca perlakuan panas
1.	Zr-0,3Mo-0,5Fe-0,5Cr	742	490,80
2.	Zr-0,4Mo-0,5Fe-0,5Cr	790	536,80

Pada Tabel 1 terlihat bahwa kekerasan ingot paduan Zr-0,4% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr *as melt* ( $= 790 \text{ VHN}$ ) lebih tinggi dibandingkan ingot paduan Zr-0,3% Mo-0,5%Fe-0,5%Cr *as melt* ( $= 742 \text{ VHN}$ ). Hal ini disebabkan adanya Mo dalam paduan berbasis zirkonium akan memperhalus ukuran butir dan membentuk senyawa intermetalik dengan zirkonium ( $\text{ZrMo}_2$ ). Ukuran butir semakin halus apabila komposisi Mo dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr semakin besar atau semakin kasar bila komposisi Mo dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr semakin rendah. Dengan demikian dapat diketahui bahwa semakin kecil ukuran butir dalam mikrostruktur paduan maka kekuatan atau kekerasan paduan semakin tinggi. Hal ini sesuai dengan persamaan Hall-Petch<sup>[3]</sup>

$$\sigma_Y = \sigma_{0Y} + k / \sqrt{d} \quad (1)$$

Dimana,

$\sigma_Y$	: kekuatan luluh, N/mm <sup>2</sup>
$\sigma_{0Y}$	: konstanta, N/mm <sup>2</sup>
k	: konstanta, N/mm <sup>3/2</sup>
d	: diameter ukuran butir, mm

Sementara itu, hubungan antara kekerasan dan kekuatan paduan dinyatakan secara empiris dengan persamaan  $\sigma_Y = (VHN/3) (0,1)^n$ , dimana  $\sigma_Y$  adalah kekuatan luluh (kgf/mm<sup>2</sup>), VHN adalah nilai kekerasan Vickers, dan n adalah eksponen pengerasan regangan<sup>[7]</sup>. Dengan demikian semakin tinggi kekerasan maka kekuatan paduan semakin tinggi pula atau sebaliknya.

Tabel 1 memperlihatkan bahwa kekerasan ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas, yaitu 490,80 VHN lebih rendah dibandingkan kekerasan ingot paduan *as melt* yaitu 742 VHN. Hal ini dimungkinkan akibat proses perlakuan panas (650°C, 1 jam) terhadap ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr sehingga terjadi perubahan bentuk butir dari *acicular* (*ingot as melt*) ke bentuk ekuiaksial yang relatif homogen. Kondisi tersebut memperlihatkan telah terjadi penurunan tegangan sisa, sehingga terjadi proses pelunakan yang berdampak pada penurunan kekerasan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr. Fenomena ini juga dialami ingot paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dimana terjadi penurunan kekerasan dari 790 VHN (*ingot as melt*) menjadi 536,80 VHN (ingot pasca perlakuan panas). Penurunan kekerasan tersebut dimungkinkan akibat adanya proses perlakuan panas (650°C, 1 jam) terhadap ingot paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr sehingga terjadi perubahan bentuk butir dari *acicular* (*ingot as melt*) ke bentuk batang pipih dan ekuiaksial kecil. Adanya dua bentuk butir berbeda dalam mikrostrukturnya menyebabkan masih ada tegangan sisa. Kondisi tersebut memperlihatkan telah terjadi penurunan tegangan sisa meskipun lebih rendah dibandingkan ingot Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr *as melt*, Kondisi tersebut mengakibatkan terjadinya proses

pelunakan sehingga kekerasan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr lebih rendah dibandingkan ingot *as melt*, tetapi lebih tinggi dibandingkan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas.

Kekerasan ingot paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr dan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas lebih rendah dibandingkan kekerasan ingot leburannya. Hal ini berarti bahwa kedua ingot paduan mempunyai kecenderungan yang sama yaitu kekerasannya menurun bila dipanaskan pada temperatur tinggi. Kondisi tersebut sesuai dengan hubungan empiris antara kekerasan logam atau logam paduan terhadap temperatur, yaitu :

$$H = A \cdot e^{-B \cdot T} \quad (2)$$

dimana H adalah nilai kekerasan Vickers, T adalah temperatur pemanasan, A dan B adalah konstanta yang bergantung pada jenis material<sup>[8]</sup>.

Dilain pihak, pada proses perlakuan panas yang sama terhadap ingot *as melt*, kekerasan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr, yaitu 490,80 VHN lebih rendah dibandingkan kekerasan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr, yaitu 536,80 VHN. Hal ini disebabkan unsur Mo diduga merupakan penghambat dalam proses pengintian, sehingga akan menghambat proses homogenisasi dari butir *acicular* ke butir ekuiaksial. Kondisi tersebut dapat menyebabkan tegangan sisa dalam paduan tinggi, sehingga kekerasan paduan bertambah tinggi apabila kandungan Mo dalam paduan Zr-Mo-Fe-Cr bertambah besar.

Berdasarkan uraian tersebut di atas dapat diketahui bahwa kandungan Mo dalam paduan dan parameter proses perlakuan panas mempengaruhi tingkat homogenitas dan kekerasan paduan Zr-Mo-Fe-Cr.

## ■ Komposisi Kimia

Tabel 2. Data uji komposisi kimia paduan Zr-Mo-Fe-Cr menggunakan XRF

No	Paduan	Komposisi paduan (% berat)							
		Teoritis				Pasca perlakuan panas			
		Zr	Nb	Fe	Cr	Zr	Mo	Fe	Cr
1.	Zr-0,3Mo-0,5Fe-0,5Cr	98,70	0,30	0,50	0,50	98,9137	0,2460	0,4371	0,4032
2.	Zr-0,4Mo-0,5Fe-0,5Cr	98,60	0,40	0,50	0,50	98,8733	0,3067	0,4504	0,3696

Berdasarkan Tabel 2 diketahui bahwa komposisi Mo pasca perlakuan panas dalam paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr adalah 0,2460 % berat atau 82,00 % dari teoritis, dan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr adalah 0,3067 % berat atau 76,675 % dari teoritis. Oleh karena komposisi Mo dalam paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr mempunyai simpangan lebih rendah dibandingkan dalam paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr, maka paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr relatif lebih homogen dibandingkan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr. Kondisi ini membuktikan bahwa semakin tinggi kadar Mo yang dipadukan maka akan semakin sulit proses homogenisasinya.

Kondisi yang ditampilkan pada Tabel 2 menunjukkan bahwa distribusi unsur pemuatan belum homogen di setiap titik dalam logam paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Kemungkinan lain, kuantitas unsur pemuatan berkurang pada saat proses preparasi pembuatan ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr *as melt* perlu dilakukan *annealing* bertingkat atau mempertinggi temperatur dan/atau waktu pemanasan guna menyempurnakan proses homogenisasi ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan dan pengkajian data dapat disimpulkan bahwa karakter mikrostruktur Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr pasca perlakuan panas (650°C, 1 jam)

berupa struktur butir ekuiaksial relatif homogen. Mikrostruktur Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr belum homogen dengan struktur butir batang pipih dan ekuiaksial. Kekerasan paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr (= 490,80 VHN) lebih rendah dibandingkan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr (= 536,80 VHN). Komposisi kimia paduan Zr-0,3%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr relatif lebih homogen dibandingkan paduan Zr-0,4%Mo-0,5%Fe-0,5%Cr. Karakter paduan yaitu mikrostruktur, kekerasan, dan komposisi kimia dipengaruhi oleh perlakuan panas dan kandungan unsur Mo dari ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Yatno Dwi Agus Susanto (PTBN-BATAN), Slamet Pribadi, A.Md. (PTBN-BATAN), Sugino, A.Md. (PUSDIKLAT-BATAN) yang telah membantu dalam penelitian karakterisasi ingot paduan Zr-Mo-Fe-Cr pasca perlakuan panas.

## PUSTAKA

1. COHEN, P., "Water Coolant Technology of Power Reactors", American Nuclear Society, Illinois, 1985.
2. SUNGKONO, "Studi Pengaruh Penambahan Kandungan Mo Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, dan Ketahanan Korosi Paduan Zr-Mo-Fe-Cr", Buletin URANIA No. 40, Oktober 2004, hal. 15-19. ISSN : 0852-4777.



- 
3. AGRAWAL, B. K., *"Intro. to Engineering Materials"*, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2000.
  4. KALPAKJIAN, S., *"Manufacturing Engineering and Technology"*, Addison-Wesley Pub. Co, Massachusetts, 1995.
  5. SUNGKONO, " Pengaruh Parameter Proses Homogenisasi Terhadap Mikrostruktur dan Kekerasan Paduan Zr-Mo-Fe-Cr", *Jurnal Ilmiah Konduktor Padat*, Vol. 5, No. Edisi Khusus, 2004, hal. 33-37.  
ISSN : 1411-3112
  6. VANDER VOORT, G.F. (editor), *ASM Handbook Vol. 9 : " Metallography and Microstructures"*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2004, p. 3 - 20
  7. MARQUES, F.D.S., *"Morphology/ Substructure Relationships in Zirconium Based Martensites"*, *J. de Physique*, Dec. 1982, p. 309-314.
  8. DIETER, G.E., *"Mechanical Metallurgy"*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1988.